

Neuroarcheologia musicale: musica come protolinguaggio

I CONTRIBUTTI

Sara Invitto, Anna Francioso
Università del Salento

ABSTRACT

This paper aims to analyze the musical percept as a precursor of language, which later evolved into a human brain structure with syntactic, spatial and temporal rules similar to the language. This will be described through the studies of Psychology of Music and through evolutionary analyses, and neuroarchaeological analysis. Through a compare and evolutionary model will be illustrated the phylogenetic development of musical perception (listening, pitch detection, physiological production and instrumental production) and how this could be considered one of the foundations of the speech.

Through this analysis we will describe how the percept music/sound exists as strongly connected both at the genetic level, biological and behavioral language functions, and we will as a capacity which the tactile receptor is involved in the processes of sound / music discrimination and production.

Keywords: evolutionary studies, language, music and brain.

Introduzione

L'universo è stato considerato muto sino a quando l'uomo non ha costruito un recettore capace di trasformare le emissioni radio in frequenze sonore.

Soltanto dopo che la Nasa ha trasdotto le emissioni radio di alcune stelle in frequenze sonore, il cui suono è simile al canto di alcuni uccelli, anche l'universo ha assunto una connotazione 'sonora' e vibrante.

Negli anni '60, il fisico svizzero H. Jenny, basandosi sulle teorie di Chladni (fisico tedesco del XVIII secolo), iniziò a sperimentare l'effetto delle vibrazioni sonore su vari tipi di materiali. Egli scoprì che a determinati suoni la materia si dispone in altrettante precise figure geometriche, rilevando, inoltre, come alcuni suoni di linguaggi antichi – nello specifico il sanscrito e l'ebraico – producano la figura stessa del simbolo alfabetico che si pronuncia.

Altri studiosi hanno successivamente sviluppato questo tipo di ricerche, evidenziando come alcuni segni/immagini, che si strutturano su una materia malleabile (es. sabbia) dalle vibrazioni del suono prodotto, corrispondano a strutture cellulari di organismi viventi e che, pertanto, ogni cellula è caratterizzata da una vibrazione specifica, che può essere paragonata ad una nota musicale.

La struttura musicale, e la sua strutturazione fisica sembrano essere proprietà nate dal nostro sistema trasduttivo – sia esso biologico che 'tecnologico' – e sembrano riproporsi a livello filogenetico non solo negli animali evoluti, ma anche in specie filogeneticamente antiche e in alcune strutture della materia.

Questo lavoro si propone di analizzare, attraverso i presupposti legati alla psicologia della musica e attraverso un'analisi evoluzionistica e 'neuroarcheologica', il percolato musicale/sonoro come precursore linguistico, come protolinguaggio che, successivamente, si è evoluto in una struttura cerebrale umana, con regole sintattiche, spaziali e temporali simili a quelle linguistiche, ma prive di connotazioni semantiche oggettive.

Il termine Neuroarcheologia è un termine nato per indicare l'articolato e rapido sviluppo di ricerche interdisciplinari focalizzate sulle questioni che emergono dall'analisi dello sviluppo cerebrale e dello sviluppo culturale attraverso traiettorie evoluzionistiche a lungo termine (Malafouris, 2010).

La Neuroarcheologia si avvale del concetto di Metaplasticità per descrivere l'interrelazione tra plasticità neurale e cambiamenti culturali. Tale concetto implica una correlazione non lineare tra modelli genetici, fisiologici e comportamentali, che sottostanno allo sviluppo e all'evoluzione delle specie.

Attraverso il modello evoluzionistico si tenterà di analizzare lo sviluppo filogenetico della percezione musicale (ascolto, produzione fisiologica e produzione strumentale) e in che modo questa si possa considerare un precursore dello sviluppo del linguaggio umano (inteso in senso semantico) e dello speech (linguaggio parlato).

All'interno di questo percorso si evidenzierà come il percolato musicale rivesta un ruolo cognitivamente ed evolutivamente importante.

La capacità musicale estremamente precoce che si può notare nei bambini ci porta a pensare che esista una predisposizione biologica e che ciò possa essere spiegato in un'ottica evolutiva, che vede la musica come un dominio con un particolare valore filogenetico.

Secondo Miller (2000), la musica possiede alcuni dei criteri classici che caratterizzano un processo di adattamento umano complesso, come l'universalità, lo sviluppo ordinato lungo l'arco della vita, il coinvolgimento di specifiche aree cerebrali, le analogie con altre specie non umane e la capacità di evocare emozioni. Probabilmente queste abilità così complesse e varieguate possono essere indicative di un processo di selezione naturale, anche se non è così semplice individuare quali siano le caratteristiche musicali che influenzano direttamente la sopravvivenza della specie umana. Per Miller l'evoluzione della musica potrebbe essere basata su un beneficio riproduttivo come il coinvolgimento sessuale.

Lo studio dello sviluppo della capacità di elaborazione musicale parte già dai neonati e richiede anche l'utilizzo di paradigmi sperimentali particolari, che permettono di rilevare la presenza di percezione e di elaborazione musicale, senza l'utilizzo di una mediazione verbale.

La musica è una capacità cognitiva complessa, costituita da una varietà di componenti distinte, che vengono percepite ed elaborate nella nostra mente attraverso un insieme di processi cognitivi.

Da un punto di vista teorico, si può dire che il forte coinvolgimento emozionale che la musica provoca sia dovuto alla quasi totale assenza di significato denotativo, dato che essa non ha un registro semantico di riferimento, come accade invece con il linguaggio.

Secondo Robert Zatorre (2001; 2005), e alla luce dei più recenti

studi, la musica sembra strutturalmente associata alle principali funzioni neurali deputate alla sopravvivenza individuale e della specie, che sono la nutrizione e la sessualità.

Essa è un'abilità potenzialmente presente in ogni essere umano.

Exaptation, “l’anello mancante nelle teorie evoluzionistiche”

Stephen J. Gould ed Elisabeth S. Vrba introdussero, nel 1982, il termine *Exaptation* per definire quelle caratteristiche apparse in origine per un ruolo (o anche per nessun ruolo), ma successivamente utilizzate per un altro: vale a dire, tutte quelle strutture utili che non sono state costruite dalla selezione naturale per il loro uso attuale (Gould, Vrba, 2008). Un esempio di exaptation sono le piume degli uccelli. Il primo uccello giurassico era dotato solo dei più semplici rudimenti per il volo, eppure era quasi del tutto ricoperto di piume. Ciò suggerisce che il piumaggio, all'origine, fosse deputato all'isolamento termico e non ad altre funzioni. Selezioni successive di modifiche nelle caratteristiche scheletriche, in specifiche sequenze neuromotorie, hanno portato all'evoluzione del volo.

Anche nello sviluppo degli esseri umani l'exaptation sembra aver avuto un ruolo molto importante, nello specifico nella genesi del linguaggio.

La teoria degli equilibri punteggiati

La *teoria degli equilibri punteggiati* nasce dalle considerazioni di Stephen J. Gould sulla *non continuità* dell'evoluzione.

Lo stesso Darwin aveva affermato che: “*molte specie, dopo essere state formate, non sono mai andate incontro ad ulteriori mutamenti (...) ed i periodi durante i quali le specie sono andate incontro a modificazioni, anche se lunghi misurati anni, probabilmente sono stati brevi in confronto ai periodi in cui hanno mantenuto la stessa forma.*” (Darwin, 1872).

Gould ed Eldredge (1972) proposero un'alternativa al gradualismo filitico e, ritenendo: “*la storia della vita...più adeguatamente rappresentata da un quadro di equilibri punteggiati, solo raramente disturbati da eventi improvvisi ed episodi di speciazione*”, ipotizzarono che gli eventi improvvisi e gli episodi di speciazione siano legati ad un cambiamento dell'ambien-

te, che provoca pressioni selettive abbastanza forti, tanto da produrre la “*rivoluzione genetica*” che supera l’*omeostasi*.

Ernst Mayr utilizzò il concetto di *omeostasi*, intendendola come autoregolamentazione dell’individuo, responsabile della stabilità della specie all’interno di una zona in cui la speciazione non esiste (Fitch T.W., 2011).

“L’ipotesi nutrizionale”

Zeresenay Alemseged e la sua équipe hanno recentemente rinvenuto in Etiopia resti scheletrici di una bambina di tre anni di età –esemplare di *Australopithecus afarensis* – deceduta per cause imprecisabili circa tre milioni e mezzo di anni fa.

Nell’articolo in cui dà conto del ritrovamento, Christopher P. Sloan (2004) sostiene che, nel succedersi degli anni, i nostri antenati impararono ad arricchire con la carne una dieta per lo più vegetariana e iniziarono a creare strumenti in pietra per tagliarla o per rompere le ossa ed estrarne il midollo ricco di proteine.

La nuova alimentazione ebbe come conseguenza un’ulteriore crescita del cervello, che facilitò, a sua volta, la nascita di nuove aree cerebrali, con nuove funzioni.

In sintesi, l’introduzione della carne nell’alimentazione dei nostri antenati avrebbe indirizzato l’evoluzione dell’uomo, determinando il progressivo incremento volumetrico e funzionale cerebrale.

Tale ipotesi, già proposta in passato, suscita tuttora indubbie perplessità.

L’*Homo Habilis*, primo rappresentante umano, conviveva all’epoca con circa una ventina di specie di *Australopithecus* e seguiva una dieta quasi esclusivamente vegetariana, cibandosi di semi, frutta, erbe, fiori e foglie, che trovava sparsi nella savana o coglieva nelle foreste.

Le teorie più accreditate sostengono che il successo della nostra specie sia legato allo sviluppo dell’intelligenza, i cui fondamenti organici posano nella materia cerebrale e nei circuiti neuronali del Sistema Nervoso Centrale.

La dimensione del cervello, a partire dagli australopitecini per arrivare a *Homo Sapiens*, come abbiamo detto prima, è andata progressivamente crescendo: 440 cc in *Australopithecus Africanus*, 640 cc in *Homo*

Habilis, 940 cc in *Homo Erectus*, 1230 cc in *Homo Sapiens*.

Negli ultimi 20000 anni, il cervello di *Homo Sapiens* è andato a diminuire di volume, benchè in tale periodo si siano realizzati i progressi più notevoli della cultura umana.

L'ipotesi nutrizionale fa riferimento all'apporto alimentare proteico, cresciuto in conseguenza dei consumi carnei. Le proteine animali, come sappiamo, contengono tutti i venti amminoacidi necessari alle sintesi proteiche operate dall'organismo umano in obbedienza al dettato genetico. Disporre di quote amminoacidiche superiori alla stretta necessità non comporta, tuttavia, un aumento del metabolismo proteico e non modifica le funzioni che tali nutrienti adempiono nell'organismo.

Ci sono due possibilità: o l'*Australopithecus* e l'*Homo Habilis* pativano una condizione di carenza proteica, dovuta alle difficoltà di copertura del fabbisogno nell'ambiente ancestrale della savana, e non riuscivano, perciò, a sintetizzare, quanto dettato dal codice genetico, oppure la loro dieta – quasi esclusivamente composta da vegetali era adeguata alle loro necessità energetico nutrizionali.

Con ogni probabilità, i consumi di carne in tempi successivi, frutto della caccia attiva di specie animali, hanno arricchito di proteine l'alimentazione dei nostri progenitori, ma non ne hanno indirizzato l'evoluzione favorendo la crescita del cervello. L'origine, la sopravvivenza e l'affermazione del genere *Homo* depongono per la congruità delle risorse nutrizionali e in particolare amminoacidiche, derivate quasi completamente da cibi vegetali, alle necessità del nascere, del crescere e del riprodursi.

Vi è un generale consenso sul fatto che lo sviluppo cerebrale sia correlato con la locomozione bipede, l'alimentazione e il rimodellamento dell'apparato mandibolare, tre caratteristiche indicate dai fossili come distintive dell'uomo rispetto alle scimmie antropomorfe.

È assai probabile che proprio il bipedismo sia all'origine dello sviluppo volumetrico del cervello e che la stazione eretta abbia rappresentato il fattore decisivo per lo sviluppo del cervello umano.

La libertà degli arti superiori e la progressiva acquisizione di nuove capacità gestuali, utili allo svolgimento di molteplici mansioni, avrebbero costituito il volano per l'evoluzione motoria, culturale e comportamentale dell'uomo, evidenziata organicamente dallo sviluppo del cervello.

Da ciò si suppone possa essere scaturito tutto il resto.

1. Componenti genetiche e biologiche della comunicazione sonora

Partiamo da un'analisi biologica sui geni coinvolti nelle funzioni comunicative.

I geni coinvolti nel linguaggio sono il Fox P2 (gene implicato anche per la fertilità) e i geni NL3 e NL4 (implicati anche nelle sindromi autistiche).

Il **gene FoxP2** è membro della grande famiglia di trascrizione chiamata *Geni fox*. “Fox” sta per “*fork head box*”, nome che deriva dalle mutazioni che avvengono in un moscerino della frutta e che provocano alla testa dell’embrione una deformazione a forma di forchetta (Haezler S., et al, 2004).

FoxP2 codifica un fattore di trascrizione, determinando se altri geni saranno letti e tradotti a loro volta.

Si stanno conducendo studi riguardo le modalità di espressione di FoxP2 in diverse specie animali. La forte influenza che FoxP2 sembra esercitare sullo sviluppo del sistema nervoso centrale non è ancora del tutto conosciuta, ma le ricerche condotte finora portano gli scienziati a denominare il gene FoxP2 come “*il gene del linguaggio*”.

Esso viene così definito perché è stato scoperto in seguito a ricerche e studi su pazienti affetti da *disprassia verbale* – con sintomi che andavano dalla articolazione non intelligibile delle parole a difetti della grammatica naturale – che non permetteva loro di descrivere una successione di eventi in ordine cronologico.

Il caso più importante che ha portato appunto a collegare il gene FoxP2 con le funzioni linguistiche è stato il caso della famiglia KE: in essa, infatti, un consistente numero di bambini era sottoposto a terapia logopedica a causa della presenza di sintomi di disprassia verbale.

Gli studi condotti da Jane A. Hurst e collaboratori, presso l’Oxford Radcliffe Hospital, permisero di accertare che circa la metà dei membri della famiglia, per tre generazioni, aveva manifestato lo stesso disturbo. Le ricerche portarono ad osservare che l’intero apparato fonarticolatorio ed uditivo non presentava alcun danno, così come erano nella norma le abilità motorie fini e cognitive. I risultati del gruppo di lavoro rilevarono un’alterazione genetica, espressa nei neuroni cerebrali e circoscritta nell’uso della parola. Dopo breve tempo, grazie al caso

particolare di uno dei membri della famiglia, si scoprì che la causa del disturbo risaliva ad un'anomalia sul cromosoma 7: una rottura in corrispondenza gene FoxP2 (Feuk L. et al, 2006).

Il risultato di questa scoperta è stato in seguito confermato da ulteriori ricerche, che hanno riscontrato le stesse anomalie nello stesso disturbo o in disturbi simili.

Studi evolutivi indicano che ci siano specifici cambiamenti nell'uomo in merito alla codificazione della sequenza di Foxp2, in un periodo compatibile con l'emergere della lingua parlata.

I dati ottenuti in varie ricerche (Lai et al., 2003) fanno ipotizzare che il FoxP2 sia in generale coinvolto nel controllo motorio della specie dei mammiferi e che abbia giocato un ruolo centrale nello sviluppo delle regioni cerebrali correlate al movimento nell'antenato dell'uomo e del topo.

Di conseguenza, i cambiamenti nella codifica del gene FoxP2 riguardano, probabilmente, la modificazione di strutture preesistenti nel cervello umano, piuttosto che l'acquisizione di nuove (Crespi et al., 2007).

La compromissione del gene Fox P2 porta a una riduzione del comportamento vocale e, in alcuni casi, alla morte prematura. La compromissione di NL3 e NL4 nelle cavie diminuisce il comportamento sociale e la vocalizzazione (Fischer and Hammerschmidt, 2011). Questo implica una stretta correlazione genetica tra abilità di vocalizzazione, socializzazione e capacità riproduttive. Un'interferenza mediata dall'RNA, che riduce i livelli di Fox P2 nelle regioni cerebrali, produce canti con moduli irregolari.

Dal punto di vista neuronale il pathway di vocalizzazione (percorso che deve seguire l'input vocale per partire da una localizzazione centrale sino ad una periferica) coinvolge un gran numero di sottosistemi differenti, sia nel canto degli uccelli che nei mammiferi terrestri, contribuendo a formare differenti livelli e gradi di vocalizzazioni e negli umani a creare le proprietà strutturali del linguaggio.

Jürgens (Jürgens, 2009) parla di due pathways di controllo della vocalizzazione: uno dalla corteccia cingolata invia input al mesencefalo acqueduttale, l'altro dalla formazione reticolare invia input al ponte, al midollo allungato e ai motoneuroni fonatori. La corteccia cingolata è coinvolta sia nel controllo volontario nei primati non umani che nel richiamo negli umani.

Altre strutture coinvolte sarebbero: la Formazione Reticolare, con

connessioni neurali ai Gangli della Base e al Cervelletto, la Corteccia Limbica e i Gangli della Base.

Solo gli umani esibiscono un pathway dalla corteccia motoria ai motoneuroni che controllano i muscoli della laringe.

Le connessioni tra la Corteccia Limbica e i motoneuroni costituiscono un tratto ancestrale trovato in molte specie non umane (Jürgens, 2002, 2009).

Questi studi indicano che i motoneuroni che innervano i muscoli delle labbra e della lingua sono connessi alla formazione reticolare.

Anche il ruolo dei Gangli della Base nel controllo motorio è fondamentale (Gazzaniga, 2004). I pathways dopaminergici che coinvolgono i gangli della base sono necessari, in molte specie di uccelli, per l'apprendimento di vari moduli di canto (Hara, 2007; Jarvis, 2004; Haesler et al., 2004).

Analizzando una specie filogeneticamente antica di mammiferi, gli euteri, si può notare come i richiami dei cuccioli scatenino comportamenti legati alle risposte dell'amigdala (questo avviene anche nella specie homo). Alcuni richiami, come le vocalizzazioni ultrasoniche (UVS) di topi cuccioli (che discendono da una delle prime specie di euteri, specie apparsa circa 125 milioni di anni fa), isolati o in ipotermia, scatenano comportamenti materni di ricerca (Fischer & Hamerschmidt, 2011).

Numerosi geni sono implicati nella variazione di USV: nello specifico, geni – anche qui – correlati al comportamento sociale.

Alcuni neuropeptidi ipotalamici (l'ossitocina e la vasopressina) escreti dalla neuroipofisi, anch'essi coinvolti nelle vocalizzazioni, sono correlati alla memoria sociale e al comportamento di maternage (Pedersen, 2006).

Esistono, quindi, delle componenti genetiche e biologiche nel comportamento comunicativo e probabilmente queste componenti possono essere dei 'cue', cioè dei segnali che possono elicitarne l'evoluzione linguistica.

Nei topi, a differenza degli uccelli, gli USV sembrano innati e non hanno bisogno di feedback acustici. Infatti, i canti degli uccelli, in termini di sviluppo ontogenetico, sono canti appresi (hanno bisogno di feedback acustici).

Per alcune specie di uccelli delle regioni temperate, l'ascolto del canto della voce materna o paterna produce un template che stimola

il canto della prole. Durante l'inverno, gli uccelli giovani iniziano a produrre un canto chiamato '*sub-song*'. La struttura del canto adulto emerge in seguito, con la pratica, in estate.

Come evidenziato precedentemente, l'evoluzione comunicativa legata alla vocalizzazione e ai canti, in molte tassonomie evolutive, è strettamente correlata con i comportamenti legati al maternage, alla riproduzione e alla socialità.

2. Componenti percettivo evoluzionistiche

A livello percettivo, abbiamo categorie di pesci – ad esempio il *goldfish* (il comune pesce rosso) – che possono imparare a discriminare i suoni, attraverso un compito di condizionamento (Chase, 2001), e discriminare la musica barocca dalla musica blues. Questo può suggerire che esistano dei meccanismi coinvolti nella percezione musicale con una datazione che appare con i primi vertebrati (500 milioni di anni fa).

In un recente lavoro di Tecumseh Fitch (2006) viene analizzato, dal punto di vista evoluzionistico, il percetto musicale (produzione e percezione) in una prospettiva interdisciplinare.

Lo studio di Tecumseh Fitch si ricollega all'analisi di Tinbergen, secondo cui le categorie di risposta del percetto possono essere analizzate su quattro livelli: meccanicistico, dello sviluppo, filogenetico e funzionale. Ad esempio, alla domanda 'Perché gli uccelli cantano?' si può rispondere da quattro prospettive teoriche differenti. Dal punto di vista meccanicistico, gli uccelli cantano perché hanno un organo vocale complesso e circuiti neurali legati al canto, che sono attivati da alti livelli ormonali. Dal punto di vista dello sviluppo, il canto degli uccelli sarebbe emerso in un ambiente pieno di canti conspecifici, appresi. Dal punto di vista filogenetico, potremmo valutare come tutti gli uccelli hanno una laringe, struttura che ci fa pensare che sia l'unico organo vocale emerso all'inizio dell'evoluzione della suddetta classe tassonomica. Infine, funzionalmente, a livello adattivo, gli uccelli hanno iniziato a cantare perché questo avrebbe migliorato l'attrazione per l'accoppiamento e la difesa del territorio.

Le funzioni però, a livello evoluzionistico, sono in continuo cambiamento a causa del fenomeno dell'*exaptation*.

Tre esempi particolarmente rilevanti per la musica sono: gli ossicini dell'orecchio medio dei mammiferi, che nacquero per una funzione di supporto della mascella e non per una funzione uditiva, le cartilagini della laringe dei vertebrati, che nacquero come funzione di supporto delle branchie e non per una funzione sonora e i polmoni, che sono omologhi della vescica natatoria dei pesci, un sistema di controllo della direzione e dell'orientamento, e che invece nei tetrapodi sono usati nel respiro e nella vocalizzazione. Questo ci indica che tutte le funzioni, pur avendo precursori comuni, si sono sviluppate in maniera differente portando allo sviluppo di compiti differenti.

3. Evoluzione del linguaggio: un'ipotesi "Exaptiva"

Un'ipotesi importante che mette in evidenza la differenza tra uomo e animale è stata sviluppata da Uwe Jürgens sulla base delle osservazioni iniziali di Hans Kuipers.

Kuipers ha esaminato le connessioni della corteccia motoria fino ai sistemi motori sottocorticali, nel tronco cerebrale e nel midollo spinale, confrontandoli tra gatti, scimpanzé, macachi e umani. In particolare si è focalizzato sui neuroni motori che controllano la laringe, situati nel nucleo del midollo. Egli ha scoperto che ci sono proiezioni dirette solo negli esseri umani, mentre nei gatti e negli scimpanzé è presente solo la connessione indiretta. Inoltre, poiché i primati non umani hanno collegamenti diretti con le mascelle, la lingua e le labbra, l'unica cosa che li distingue dagli umani è il mancato controllo della laringe.

Questi ed altri dati hanno portato gli scienziati ad ipotizzare che le connessioni dirette cortico-motorie con la laringe svolgano un ruolo chiave nelle capacità del linguaggio.

Il quesito che Jürgens si pone riguarda come gli esseri umani abbiano sviluppato queste connessioni dirette che mancano agli altri mammiferi. Probabilmente questo è avvenuto attraverso sistemi di pre-adattamento, situati nel tratto cortico-spinale dei mammiferi. Il tratto cortico-spinale è un'importante via discendente della corteccia motoria fino ai motoneuroni del midollo spinale. Gli assoni cortico-spinali hanno origine nei neuroni primordiali dello strato V della neocorteccia.

Un tratto cortico-spinale è presente in tutti i mammiferi. Una se-

rie correlata alle proiezioni del tratto cortico-motore costituisce il tratto cortico-bulbare, che proietta dalla corteccia fino ai vari nuclei motori del tronco cerebrale e controlla la mascella, le labbra e le altre muscolature facciali.

Dunque, negli animali i tratti cortico-bulbari e cortico-spinali sono collegati con i motoneuroni situati in prossimità dei motoneuroni della laringe, che si trovano nel nucleo ambiguus. Connessioni dirette cortico-spinali, sono presenti anche negli uomini (Fitch, 2011).

Terrence Deacon (2007) ha tentato di rispondere al perché collegamenti neuronali con la laringe si sviluppino solo negli uomini e non nel resto degli animali.

La maggior parte dei mammiferi condivide un sistema neurale di base per la produzione vocale specie specifica, che comporta un centro di controllo situato nella sostanza grigia peri-acqueduttale del mesencefalo.

Tale sistema permette all'intera specie di produrre i propri suoni tipici o vocalizzazioni innate – come il riso ed il pianto negli esseri umani – e non si basa su input corticali. Infatti i bambini anencefali, che mancano della neocorteccia, possono comunque sorridere e piangere normalmente.

Secondo Deacon, durante lo sviluppo, c'è concorrenza tra il "pre-potente" tronco encefalico e gli assoni corticali che, proiettando verso il basso, attraverso il tronco encefalico, si collegano ai neuroni motori della laringe del nucleo ambiguus.

In base a tale ipotesi, lo stesso procedimento potrebbe essere sperimentalmente indotto anche negli altri mammiferi.

È ovvio che qui si parla esclusivamente di una capacità motoria della parola, che non equivale, tuttavia, alla capacità linguistica in senso stretto. Ciò fornisce, tuttavia, un esempio di come un particolare circuito neuronale, coinvolto nella lingua parlata, potrebbe essersi evoluto attraverso l'*Exaptation* di un circuito motorio preesistente presente nei primati.

4. Evoluzione e Percezione Musicale

Una recente ricerca di R. Zatorre e al (2002) avanza un'ipotesi sullo sviluppo nel tempo di una struttura asimmetrica della corteccia uditiva.

La corteccia uditiva è relativamente specializzata nei due emisferi: l'area sinistra è più specializzata per la risoluzione di eventi temporali, mentre l'area destra è più funzionale nella risoluzione spettrale dei toni.

L'ipotesi avanzata dai ricercatori suggerisce che le asimmetrie corticali possano essersi sviluppate come una soluzione generale al bisogno di ottimizzare l'elaborazione dell'ambiente acustico, nei domini di frequenza spettrali e temporali. Accettando l'ipotesi dell'esistenza di una relativa asimmetria emisferica nell'elaborazione dei suoni linguistici e tonali, le ricerche hanno seguito la linea del se e come sono nate tali asimmetrie. La proposta avanzata è stata che esiste un relativo "scambio" tra le specializzazioni richieste per ogni tipo di elaborazione, in modo da consentire la risoluzione di un dominio a discapito dell'altro.

Una relazione reciproca è possibile in un sistema lineare, mentre il sistema nervoso uditivo è altamente non lineare e non distribuito. Infatti esso deve spesso elaborare segnali poco ottimali a causa di condizioni rumorose, che sono di intralcio alla corretta elaborazione dei segnali.

Sulla base di questi presupposti, le asimmetrie emisferiche nell'elaborazione uditiva sono il frutto di una soluzione evolutiva specifica per frequenze spettrali e temporali. Piuttosto che sacrificare un tipo di elaborazione in favore di un'altra, sarebbe una conseguenza più vantaggiosa sviluppare i due sistemi parallelamente nei due emisferi, ognuno specializzato o per le elaborazioni temporali rapide o per le elaborazioni spettrali.

Registrazioni neurofisiologiche nei macachi hanno dimostrato che i neuroni della corteccia uditiva hanno spesso dei profili di risposta complessi, che incorporano la sensibilità a caratteristiche tonali, sia temporali che spettrali.

Eggermont notò che nella corteccia uditiva dei gatti c'era una correlazione tra l'ampiezza e la frequenza dello stimolo sonoro, tale che i neuroni con più larga ampiezza di banda tendevano ad avere una maggiore sensibilità ai cambiamenti temporali e viceversa; ciò lo indusse a ritenere la propria scoperta in accordo con la teoria intuitiva secondo

la quale una sintonia di frequenza più ampia dovrebbe consentire una migliore risposta temporale.

Dati più rilevanti furono ottenuti da Liègeois e Chauvèl che, grazie alle registrazioni del potenziale elettrico della corteccia uditiva – effettuate tramite elettrodi impiantati, osservarono la presenza di risposte a frequenze temporali brevi del suono, parlato e non, nell'area sinistra del giro di Heschl e notarono che nella corteccia uditiva destra vi è una maggiore sintonizzazione per le frequenze rispetto alla corteccia uditiva sinistra.

Tutti questi dati risultano essere coerenti con l'ipotesi che la corteccia uditiva sinistra sia maggiormente sensibile alla percezione del linguaggio, mentre l'area destra della stessa ha una migliore risoluzione spettrale tonale.

Zatorre ed i suoi collaboratori hanno verificato, sottoponendo alcuni soggetti a due parametri di stimolo (velocità di modulazione della frequenza e distribuzione spettrale all'interno dei pattern), se l'aumentare della velocità del cambiamento temporale fosse captato meglio dall'area corticale sinistra e se invece l'aumento degli elementi spettrali fosse "recepito" meglio dall'area corticale destra.

Si è visto che entrambi gli emisferi rispondevano ai diversi parametri, ma il dato che Zatorre ha considerato più rilevante riguarda l'elevata frequenza del flusso sanguigno cerebrale nella regione uditiva anteriore destra in seguito all'aumento degli elementi spettrali, mentre nell'area simmetrica si è verificato l'esatto contrario. Anche una terza area, situata nel solco temporale superiore di destra, ha mostrato un'elevata attività in presenza di stimoli spettrali e non in presenza di quelli temporali.

Tali dati sembrano essere compatibili con le ultime acquisizioni riguardanti gli arrangiamenti gerarchici della corteccia uditiva dei primati.

5. La percezione e l'elaborazione dei suoni

La percezione e l'elaborazione dell'informazione acustica prevedono una serie di passaggi ed il coinvolgimento, oltre che della corteccia uditiva, anche di altre aree cerebrali e non.

Il suono, infatti, viene tradotto nella coclea e viene progressivamente

trasformato nel tronco encefalico, grazie alla presenza del complesso olivare superiore e del collicolo inferiore. Dal talamo, poi, l'informazione viene proiettata alla corteccia uditiva primaria, dove vengono elaborate informazioni specifiche del suono come l'altezza, il timbro e l'intensità.

Inoltre il talamo è anche connesso con l'amigdala e con la corteccia orbito-frontale, strutture coinvolte nel comportamento emozionale.

Le funzioni acustiche della musica sono molto più diversificate rispetto a quelle linguistiche, a causa dell'ampia eterogeneità dei suoni.

Ricerche che si focalizzano sul *pitch* – uno specifico aspetto tonale ritenuto da Zatorre una componente decisiva di tutto il sistema musicale poiché permette la creazione di strutture come le melodie – sostengono che, negli schemi melodici, specifici intervalli di rapporto tra *pitches* sono cruciali e sono accuratamente codificati nella memoria.

Il *pitch* rappresenta la frequenza fondamentale percepita di un suono, è uno degli attributi principali del suono insieme all'intensità e al timbro.

Deviazioni dai valori 'natural' del rapporto degli intervalli di tonalità sono rilevate e discriminate immediatamente dall'ascoltatore, anche quando sono relativamente piccole. Per esempio, le melodie usano normalmente cambi di tonalità dell'ordine di $1/12$ o di $1/6$ di un'ottava e la suddivisione in ottave, nelle diverse culture, tende a riproporsi sempre nello stesso modo (con gli stessi rapporti)

I cambiamenti tonali tendono a manifestarsi su una scala temporale di magnitudo più lenta rispetto a quella delle consonanti del linguaggio. Alcune componenti veloci del *pitch* influenzano alcuni parametri delle strutture melodiche come il timbro e il fraseggio, ma le note musicali restano normalmente più lunghe della durata caratteristica del fonema di una consonante e le melodie con durata più breve sono difficili da identificare.

Alcune ricerche effettuate su soggetti affetti da amusia, a volte anche bilaterale, mostrano come la struttura asimmetrica favorisca il coinvolgimento della corteccia temporale destra in processi di elaborazione tonale o spettrale. Lesioni nel giro di Heschl portano a percepire l'altezza di un suono spettralmente complesso privo di connotazione sonora (questo dato è stato analizzato anche attraverso la MEG).

Inoltre, danni alla corteccia destra uditiva portano ad una maggiore abilità nel determinare la direzione del cambiamento tonale tra due note, ma comportano l'incapacità di discriminazione delle due note.

Altri pazienti, che invece mostravano un aumento della soglia percettiva quattro volte maggiore, hanno fatto ipotizzare agli studiosi che le lesioni non distruggano le abilità di discriminazione di per sé, ma piuttosto producano difficoltà nella discriminazione di piccoli suoni.

Più genericamente, alcune analisi effettuate attraverso la risonanza magnetica funzionale, evidenziano una specializzazione relativa nella regione uditiva destra per l'elaborazione timbrica in una grande varietà di compiti percettivi inclusi la discriminazione della tonalità delle melodie, il mantenimento della tonalità prosodica, le immagini melodiche, la discriminazione della durata del tono in piccoli pattern, la riproduzione di pattern di tonalità ritmiche, la discriminazione timbrica in stimoli dicotici e la rilevazione di accordi devianti.

6. La relazione tra musica e linguaggio

Il linguaggio e la musica rappresentano gli aspetti cognitivamente più complessi del suono.

Queste due abilità condividono alcune proprietà, come il fatto che traggono vantaggio dalla modulazione di parametri acustici; inoltre sono entrambe caratterizzate dalla loro natura generativa, costituita da una regola basata sulla permutazione di un limitato numero di elementi discreti (come fonemi o toni) per produrre strutture più significative (parole o melodie).

Musica e linguaggio condividono anche altre caratteristiche, come per esempio il fatto che entrambi mostrano uno specifico, e relativamente costante, percorso di sviluppo.

Ciò non vuol dire che linguaggio e musica siano funzioni innate alla base delle capacità cognitive, ma potrebbero derivare da determinate proprietà funzionali del sistema nervoso uditivo.

La differenza più ovvia tra i due consiste nel fatto che il linguaggio può essere prodotto solo dalle nostre corde vocali, mentre la musica può essere prodotta da ogni cosa in grado di generare un suono, oltre che dalla stessa voce umana. Infatti sono stati identificati alcuni parametri acustici, particolarmente importanti per la trasmissione vocale, che tendono ad enfatizzare le proprietà temporali del suono vocale.

Il linguaggio contiene una grande varietà di complessi di suoni di piccole variazioni temporali, incluse componenti periodiche e aperiodiche, rumori, frequenze e modulazioni di ampiezza e così via.

Vari scienziati si sono interessati, inoltre, ai segnali acustici che sono alla base delle consonanti di arresto, che come descritto per i suoni linguistici precedenti, sembrano essere universali. È stato osservato che la percezione delle consonanti di arresto è correlata con la capacità di elaborare differenze temporali in decine di millisecondi. La percezione delle categorie fonetiche spesso dipende dalla temporizzazione relativa degli eventi acustici all'interno di questa gamma.

Questi dati sono stati esplicitati chiaramente in uno studio di Shannon (1995), dal quale risulta che una relativa buona comprensione del linguaggio potrebbe essere ottenuta con due soli canali spettrali.

7. Analisi comparata e funzionale

Jin Meng, Yuanqing Wang e Chuankui Li (2011) hanno descritto il ritrovamento di un fossile completo di mammifero del Mesozoico recentemente trovato in Cina, completo al punto da presentare alcune delle caratteristiche di transizione tra l'orecchio dei rettili e quello dei mammiferi: tali caratteristiche colmano il vuoto fossile dell'evoluzione dell'orecchio medio dei mammiferi.

Il nuovo fossile, denominato 'Liaoconodon hui', in riferimento alla località cinese dove è stato rinvenuto, è lungo circa 35,7 centimetri dal naso alla punta della coda e viveva tra 125 e 122 milioni di anni fa. L'olotipo della nuova specie presenta il martello, l'incudine e la staffa, disaccoppiati dalla mascella inferiore, come era stato previsto, ma in esso, diversamente dai mammiferi attuali, i tre ossicini dell'orecchio medio sono sostenuti da una struttura cartilaginea ossificata (cartilagine di Meckel), situata in una scanalatura sulla mascella inferiore.

Le osservazioni effettuate sull'olotipo suggeriscono anche che le caratteristiche dell'orecchio medio si sono evolute almeno due volte nei mammiferi: una prima volta per originare le caratteristiche dell'orecchio medio dei Monotremata e una seconda volta per dare inizio alle caratteristiche dell'orecchio medio del gruppo Metatheria (marsupiali) ed Eutheria (placentati).

Come hanno evidenziato Darwin e Tinbergen, una componente cruciale per le ricerche filogenetiche e per le funzioni è il metodo comparativo: l'uso dei dati da specie viventi può supportare disegni inferenziali sui predecessori estinti e sulle funzioni adattive, poiché la syrinx degli uccelli (organo vocale situato nella parte bassa della trachea) non fossilizza e lo stesso accade per la laringe umana (il metodo comparativo può solo dedurre dei modelli dalle strutture esistenti).

Bisognerebbe distinguere due tipi di similarità: l'omologia e l'analogia, poiché portano a due differenti tipi di inferenze.

I tratti omologhi sono presenti in due o più specie che hanno discendenti comuni. I caratteri omologhi sono fondamentali per le ricerche filogenetiche e tassonomiche. Ad esempio noi condividiamo un gran numero di caratteri omologhi con gli scimpanzé, inclusa la propensione all'uso di strumenti. Possiamo concludere da questo che il nostro predecessore comune con gli scimpanzé (LCA), che visse in Africa 5-7 milioni di anni fa, aveva una propensione all'uso degli strumenti.

I tratti analoghi, invece, non sono presenti in antenati comuni, ma si sono evoluti indipendentemente nelle linee evolutive. Ad esempio, il volo del pipistrello e degli uccelli si è evoluto indipendentemente, perché entrambe queste specie hanno un predecessore comune: un rettile terrestre, che non volava.

Un esempio importante di tratti analoghi è l'apprendimento vocale negli umani e negli uccelli che si sono evoluti indipendentemente, ma hanno tratti comuni.

Quasi tutte le categorie tassonomiche di animali emettono vocalizzazioni sonore complesse, ad esempio molti mammiferi marini (Payne, McVay, 1971), anfibi, pesci e insetti (Alcock, 2005).

I 'canti' e le vocalizzazioni degli animali possono definire suoni semplici e innati o complessi e appresi. Questa definizione di canto e di vocalizzazioni (basata su presupposti etologici) può coincidere quasi interamente con quella umana, con la sola eccezione che il canto va distinto dallo speech.

8. Dal suono al gesto

Oltre al canto, un'altra modalità per produrre musica è il '*drumming*' (percussione). L'uso di strumenti (inclusa la percussione su parti corporee) per produrre un suono è universale nella specie umana e frequente nei primati. I grandi primati africani (scimpanzé e gorilla) usano percuotere con strumenti parti del corpo, alberi o altri oggetti, come segno di socializzazione, di lotta e di gioco (Arcadi, Robert e Mugurusi, 2004; Schaller, 1963). Il Drumming bimanuale nei grandi primati africani può indicare una forte omologia per quello che riguarda l'uso degli strumenti musicali negli umani.

Un'altra categoria di primate che usa il *drumming* è quella dei macachi. In uno studio di Remedios (2009) si valuta come, in questi animali, i suoni prodotti attivino la corteccia temporale. Osservando gruppi sociali di macachi, si è studiato come questi animali usino oggetti per produrre suoni periodici salienti, simili a gesti musicali.

Studi comportamentali hanno confermato che questi suoni attraggono l'attenzione degli altri membri del gruppo nello stesso modo delle vocalizzazioni dei conspecifici.

Primo risultato dell'analisi comportamentale dello studio di Remedios è stato che i suoni ascoltati venivano percepiti in funzione di una dominanza sociale.

Nel secondo livello di analisi l'autore ha valutato, attraverso la Risonanza Magnetica Funzionale (fMRI), quali regioni cerebrali siano attivate in maniera preferenziale dai suoni *drumming* e dalle vocalizzazioni. La fMRI ha evidenziato come in entrambi i livelli di percezione sonora si attivi sia la corteccia uditiva caudale che l'amigdala.

Le risposte comportamentali al *drumming* e ai suoni vocali, così come la loro rappresentazione neurale, suggeriscono un'origine comune del sistema vocale e di quello di comunicazione non vocale e supportano la nozione di un'origine gestuale dello speech e della musica.

Ciò era stato in parte proposto da un altro studio (Gil-da-Costa et al., 2006) in cui si era valutato come i suoni di richiamo conspecifici nei macachi attivino anche le aree di Broca e di Wernicke. Tali risultati suggeriscono che un probabile progenitore comune ai macachi e agli umani, vissuto circa 25-30 milioni di anni fa, potenzialmente poteva possedere meccanismi neurali candidati per l'*exaptation* dello sviluppo linguistico.

I primi strumenti musicali: I dati archeologici umani riguardanti l'uso dei primi strumenti musicali sono più fortunati dei dati relativi alle conformazioni anatomiche preistoriche, in quanto gli strumenti, costruiti in osso, si sono potuti conservare nel tempo: tali strumenti, in particolare flauti, risalgono infatti a circa 36.000 anni fa (Cross 2003; D'Errico et al., 2003).

Il più antico flauto ritrovato in buone condizioni risale a 36.800 anni fa circa ed è stato costruito con un osso delle ali di un cigno. Presenta 3 fori a distanza di 3-4 cm di spazio (Fitch, 2000).

Altri strumenti che probabilmente venivano usati per produrre musica sono ossa di mammut e corna di toro. È importante notare che flauti fatti di osso sono inusuali nelle culture umane, dove invece sono più frequenti flauti di legno o di canne. Questo indica che, probabilmente, i flauti sono apparsi anche prima, ma non si sono potuti conservare a causa del deterioramento (che dura circa alcune migliaia di anni). Stesso discorso varrebbe anche per gli strumenti a percussione, fatti di materiali deteriorabili nel tempo.

Dunque la musica strumentale ha un'età che possiamo datare minimo a 36.000 anni fa, ma che, probabilmente, è molto più antica.

È stato ritrovato anche un probabile flauto (un osso cavo con due fori) risalente all'età Neandertaliana (40.000 anni fa). L'osso, analizzato con il carbonio radioattivo, risalirebbe a 43.100 anni fa (Kunej & Turk, 2000). Il ritrovamento è stato fatto in una grotta della Slovenia, insieme ad altri utensili risalenti anch'essi all'età Neandertaliana.

Si potrebbe far risalire, quindi, l'inizio della produzione musicale umana al periodo Neandertaliano (Krings et al, 1997).

9. Comunicazione, protolinguaggio e linguaggio prosodico

Molte linee di ricerca supportano l'ipotesi che il sistema comunicativo musicale e i canti precedano il sistema linguistico vero e proprio.

Originariamente questa ipotesi fu avanzata da Darwin e successivamente venne ripresa da altri studiosi. Darwin ipotizzò che un sistema primitivo di comunicazione sonora simil-canto abbia rappresentato un precursore del linguaggio umano – che fu adattivo per i progenitori

umani – e che il sistema musicale odierno esista come una sorta di fossile comportamentale di questo sistema passato.

Il primo passo verso l'evoluzione del linguaggio fu probabilmente il passaggio da una comunicazione "pidgin", ovvero una lingua semplificata sviluppatasi tra soggetti che condividevano lo stesso ambiente, al fine di rendere comprensibili le situazioni di interesse e che non disponeva di un vocabolario esteso o di una grammatica articolata. Le nuove generazioni, nate in ambienti che usufruivano della lingua "pidgin", acquisivano questa base e ne sviluppavano la grammatica (Diamond, 1992).

Gli studi evoluzionisti sullo sviluppo del Sistema Nervoso Centrale degli ominidi, hanno evidenziato come vi siano stati una considerevole crescita e un forte sviluppo della massa cerebrale (EQ) (Geary, 2005) nell'ultimo milione di anni.

L'aspetto più importante di questa evoluzione è la formazione di aree cerebrali prima inesistenti: le aree pre-frontali e infero-temporali, deputate al linguaggio verbale. Esse sono le ultime a terminare la propria maturazione nello sviluppo ontogenetico umano e si sviluppano negli emisferi cerebrali con un'asimmetria anatomica e funzionale.

È interessante la scoperta di reperti di ossa craniche – risalenti a circa 3 milioni di anni fa – in cui, attraverso ricostruzioni plastiche, si può notare un aumento della massa cerebrale di circa il 44%. Questo rappresenta l'inizio della specie Homo. L'espansione riguardava soprattutto le aree di Broca e di Wernicke, nei lobi temporali. Numerose trasformazioni e un importante sviluppo della capacità cranica si ebbero nel corso del tempo, con la comparsa dell'Homo erectus, da cui discende l'uomo di Neanderthal e, infine, l'Homo Sapiens Sapiens (comparso circa 40.000 anni fa, con capacità cranica di 1350cc, presentava varie modificazioni dello scheletro, tra cui l'allungamento delle ossa).

Resta da capire cosa abbia portato a questi cambiamenti evolutivi, molto marcati nell'uomo rispetto agli altri mammiferi. I due fattori decisivi sembrano essere l'andatura bipede, che ha reso possibile usare gli arti superiori per attività diverse dalla deambulazione e lo sviluppo della comunicazione linguistica.

L'uso del linguaggio verbale potrebbe essere iniziato con la comparsa dell'Homo habilis: il calco del cranio, infatti, appare lievemente più ampio nelle aree di Broca e di Wernicke. Inoltre, la mielinizzazione di queste aree avviene in fasi tardive dello sviluppo del bambino e ciò con-

ferma che esse sono filogeneticamente recenti, le ultime sviluppatesi durante l'evoluzione. Esse sono perciò raggruppate nella neo-corteccia, la struttura che più differenzia l'uomo dalle altre specie animali.

Interessante è la differenziazione delle aree cerebrali adibite ai processi spettrali e temporali, alla percezione dei suoni musicali e non: in particolare, la corteccia uditiva sinistra sembra essere specializzata nella ricezione degli stimoli a banda larga, che cambiano rapidamente, ossia del linguaggio, della lingua parlata; la corteccia uditiva primaria dell'emisfero destro è invece adibita alla ricezione degli stimoli a banda stretta, più lenti, ovvero dell'informazione tonale e prosodica.

Le teorie sull'evoluzione della musica concordano sul fatto che la musica influenzi il sistema affettivo degli ascoltatori. Le caratteristiche prosodiche dello speech ('Maternese') (Snowdown & Teie, 2010) influenzano il comportamento affettivo dei neonati (o dei bambini in età pre verbale) e degli animali domestici, suggerendo che le caratteristiche musicali possono influenzare il comportamento di molte specie animali.

In un recente lavoro di Snowdown si sono inserite delle vocalizzazioni di scimmie Tamarin in alcuni brani musicali. Si è poi confrontata la risposta comportamentale delle scimmie a brani composti per umani e a brani composti per le scimmie. Le scimmie rispondevano con un aumento o una diminuzione dell'arousal a brani musicali composti sulle tonalità e frequenze dei Tamarin. Dunque le componenti affettive nella musica umana potrebbero avere origini evoluzionistiche nella struttura di richiami non umani. In più, i segnali animali si potrebbero essere evoluti per gestire il comportamento legato all'attivazione emozionale elicitata dai suoni.

10. Cognizione ed evoluzione

Il cervello è l'organo preposto al controllo e alla coordinazione di tutte le funzioni organiche, contiene all'incirca cento miliardi di cellule nervose ed ognuna di esse entra mediamente in contatto con circa cinquanta, centomila altri neuroni che gli permettono di elaborare le informazioni provenienti dai diversi tessuti dell'organismo, per produrre la risposta comportamentale più funzionale agli stati di necessità del corpo e alle situazioni ambientali.

In questo senso, *il cervello è l'organo primario dell'adattamento.*

Nel corso dell'evoluzione degli esseri viventi, il cervello si è via via complicato con apparati di analisi ed integrazione delle informazioni sempre più sofisticati, che hanno permesso alla risposta adattativa di realizzarsi non più in via esclusivamente riflessa ed automatica, come avveniva ed avviene negli organismi inferiori, ma in modo intelligente ed aperto all'esperienza.

Dalla comparazione morfo-strutturale e funzionale tra il cervello dell'*Homo Sapiens Sapiens* e il cervello di scimmia è stato possibile notare la presenza di un valore costante, pari a 0.35, ricavato applicando la *formula del coefficiente di asimmetria* al volume endocranico di alcuni ominidi (Anderson et al., 1999).

Questo valore costante è in linea con la teoria evoluzionistica di Darwin, sopracitata, che ipotizzava che l'evoluzione biologica dell'uomo fosse soggetta a cambiamenti graduali.

Jerison afferma che negli ultimi due milioni di anni il cervello umano ha avuto un forte incremento volumetrico, preceduto da un alto incremento di densità dendritica. I calchi endocranici dei primi mammiferi indicano cervelli piccoli con scarsa neocorteccia, divisa in 20-25 grossolane aree corticali, inclusi i campi sensoriali primari e secondari.

Studi comparativi (Kaas., 2008) indicano che i primati primordiali ebbero dieci o più aree visive e somatosensoriali, con rappresentazioni espanse delle zampe anteriori. Appena si furono sviluppati grossi cervelli nei nostri predecessori ominidi, il numero delle aree corticali andò incrementandosi, facendo emergere la specializzazione emisferica.

L'elevata densità neuronale aumentò le capacità di immagazzinamento e di selezione dei dati sensoriali. Nell'arco di due milioni di anni il cervello si ampliò notevolmente, così come notevolmente si andò specializzando la sua organizzazione rispetto a quella dei cervelli dei primi mammiferi (Geary, 2005).

In sintesi, il nostro cervello rappresenta il risultato di una triplice sovrapposizione di strati dei tre tipi di cervello apparsi nel corso della trasformazione evolutiva dei vertebrati, vale a dire:

Il *cervello più antico*, specializzato nel controllo delle funzioni automatiche, come la vigilanza, la respirazione e la circolazione comprendenti parti del sistema troncoencefalico.

I centri che si sono sovrapposti a queste strutture, come l'amigda-

la, il talamo e i nuclei del putamen, fanno parte del cosiddetto *cervello emozionale*: dalle loro funzioni dipendono il comportamento emotivo e motivazionale ed i meccanismi del rinforzo psicologico, che sono alla base dei processi di apprendimento.

La *neocortex* rappresenta la parte evolutivamente più recente del cervello umano. Essa rappresenta lo strato corrugato delle cellule nervose ed è la sede delle funzioni psichiche superiori, come l'intelligenza razionale ed il linguaggio (Atsushi & Miki, 2012).

Come abbiamo potuto notare, il cervello dei primati ha molte analogie con quello umano: la sua forma è asimmetrica verso sinistra, sia nell'uomo che nelle grandi scimmie; vi sono, tuttavia, alcune differenze, in particolare per quanto concerne la citoarchitettura e lo sviluppo della neocorteccia (Geary, 2005).

Nell'uomo, la durata dello sviluppo prenatale del cervello è superiore che negli altri primati e, inoltre, la densità sinaptica della corteccia frontale ha apice verso i cinque anni di vita, mentre nella scimmia questa densità è in aumento negli ultimi periodi di vita intrauterina e nei primi mesi dopo la nascita (Anderson et al., 1999).

11. Il ruolo della selezione naturale nell'evoluzione del cervello e delle abilità cognitive

Nel 1871, Darwin ipotizzò che le caratteristiche della selezione sessuale avessero contribuito all'evoluzione delle abilità cognitive e del cervello nei primati; in seguito, altri hanno lavorato su tale ipotesi (Pawlowski, 2003; Sawaguchi, 1997; Flinn et al., 2005).

Sono state rilevate consistenti prove di una relazione tra la complessità delle relazioni sociali in generale e la dimensione della neocorteccia delle specie dei primati e di alcune altre specie, come i carnivori.

Per quanto riguarda, in particolare, la selezione sessuale, Pawlowski e Sawaguchi hanno trovato una relazione tra l'intensità della competizione maschile e la misura della neocorteccia tra le specie dei primati.

Sawaguchi trovò che la correlazione tra specie incrociate tra la dimensione relativa della neocorteccia e gli indici di intensità di comunicazione era piuttosto alto.

Le competenze specifiche – sociali, comportamentali e cognitive –

che guidano tale relazione tra misure cerebrali e intensità dell'attività di competizione maschile, includerebbero le abilità di mantenere e manipolare relazioni sociali, in modo da facilitare l'accesso alle femmine estrali (Geary, 2005). L'osservazione della politica sessuale dei maschi degli scimpanzé sembra confermare queste ipotesi.

In ogni caso, ogni volta che le competenze sociali – incluse quelle associate alla competizione femminile e al mantenimento dei rapporti coniugali come per gli uomini – migliorano le prospettive riproduttive, ci saranno sia un'elaborazione evolutiva di queste competenze che dei cambiamenti in supporto ai sistemi cognitivi. Queste ipotesi però, non sono state largamente valutate, nonostante Geary abbia presentato prove in linea con l'idea che la competizione femminile negli esseri umani – che coinvolge in gran parte la manipolazione dei comportamenti nelle relazioni sociali – ha incrementato la specificità socio-cognitiva e l'adattamento del cervello.

Alcuni ricercatori hanno spiegato l'evoluzione delle abilità cognitive, grazie ai risultati di ricerche che fanno riferimento a livelli di attività di geni nel cervello umano, che cambierebbero notevolmente rispetto a scimpanzé e macachi. Si è inoltre scoperto che queste variazioni possono essere causate da alcune *molecole chiave di regolazione di altri geni e di processi biologici*, denominate micro-RNA.

I ricercatori hanno analizzato l'attività genica nei cervelli di esseri umani, scimpanzé e macachi per tutto il loro ciclo di vita (a partire dai neonati), focalizzandosi su due regioni del cervello: *il cervelletto*, coinvolto nel controllo motorio, nel linguaggio e in altre funzioni e *la corteccia prefrontale*, che riveste un ruolo cruciale nella programmazione dell'azione e del comportamento.

Analizzando, inizialmente, le differenze tra l'attività genica del cervelletto e della corteccia prefrontale, non si osservano grandi cambiamenti all'interno di un percorso filogenetico.

Osservando invece le differenze nell'attività genica durante lo sviluppo ontogenetico (ossia dei singoli individui), i ricercatori hanno riscontrato che per centinaia di geni gli esseri umani mostrano schemi di sviluppo peculiari, con profili differenti nella forma e nella tempistica da quelli osservati negli scimpanzé e nei macachi.

Tali schemi specifici di attività dei geni durante lo sviluppo sono particolarmente diffusi nella corteccia prefrontale e superano di quattro volte quelli presenti negli scimpanzé, mentre per quanto riguarda

gli schemi di sviluppo del cervelletto, sono meno specifici quelli dell'uomo.

Molti dei geni che mostrano questi schemi specifici nella corteccia prefrontale dell'uomo hanno ruoli neurali specifici: ciò implica un ruolo per lo sviluppo cognitivo umano.

Inoltre gli schemi di sviluppo dei geni che codificano le molecole di micro-RNA hanno mostrato di avere un enorme sovrappiù di differenze specifiche dell'essere umano nella corteccia prefrontale rispetto a schemi di sviluppo confrontabili nei geni ordinari.

Da un'ulteriore ricerca, in cui si è sottoposto un gruppo di scimmie ad un'analisi effettuata tramite la risonanza magnetica, emerge una macroscopica espansione della sostanza grigia corticale, compresa la regione interparietale.

Sebbene tali risultati non siano ancora del tutto certi, parrebbero dimostrare che il cervello è un organo altamente adattabile, più di quanto si possa pensare: l'esposizione ad un nuovo ambiente culturale, ad esempio, lo induce ad evidenziare non solo la plasticità funzionale, ma anche un esteso e persistente cambiamento morfologico.

La ridondanza del cervello – inizialmente adottato per stabilizzare il sistema contro un inatteso rumore ambientale o in risposta a cambiamenti evolutivi come la crescita del corpo – permette al sistema vitale di essere polisemico.

Ciò consente l'utilizzo dei sistemi corticali per eseguire funzioni diverse, come ad esempio nel caso dell'utilizzo degli utensili in combinazione con altre parti del cervello.

Tuttavia mentre le funzioni cognitive superiori dell'uomo sembrano essersi evolute molto più rapidamente di quanto ci si potrebbe aspettare, i processi biologici evolutivi di adattamento al mutare delle contingenze ambientali esterne rimangono una questione aperta.

Nell'evoluzione, la corteccia parietale si è ampliata forse per un adattamento alle richieste provenienti dall'ambiente o forse per controllare i diversi movimenti delle varie parti del corpo, mentre la corteccia prefrontale può essersi ampliata in seguito per controllare tali informazioni codificate nella corteccia parietale attraverso interazioni prefrontali.

In questo modo i meccanismi neurali sono stati "incorporati" nel cervello con la funzione di pre-adattamento per un'ulteriore evoluzione neurale, consentendo la facoltà del linguaggio e, attraverso l'espansione prefrontale, le modalità avanzate di controllo esecutivo.

12. Analogie cerebrali e cerebellari uomo-scimmia

È risaputo che il cervello umano è maggiore di quello dei primati.

Indagini allometriche – effettuate da Rilling e R. Seligman (2002) – con la MRI (*Magnetic Resonance Imaging*) su 44 primati viventi di 11 diverse specie, in comparazione con l'uomo, hanno dimostrato che il volume totale dei lobi temporali è maggiore nell'uomo, seguito da Pongo e Gorilla.

Incrementando il volume cerebrale, in particolare a livello corticale, le asimmetrie dei lobi temporali sembrano ridursi.

Con lo stesso metodo dell'MRI, K. Semendeferi e A. Damasio (1999) hanno condotto studi su crani di uomini moderni, ominidi e scimmie.

Gli autori sostengono che il *cervelletto* umano è più piccolo rispetto a quello delle grandi scimmie, avendo avuto un piccolo incremento durante l'evoluzione. Ciò fa pensare che ci sia stato poco differenzamento cerebellare tra uomo e grandi scimmie. Osservano inoltre che il *lobo frontale* nell'uomo e nelle scimmie ha aspetto simile pur presentando differenze inter- ed intra-specifiche.

Nelle scimmie la corteccia anteriore ventromediale temporale (aVMT) riceve gli stimoli primari dalla corteccia perinale (TE). I dati indicano strette analogie tra uomo e scimmia per quanto riguarda le funzioni aVMT, area superiore collegata ai processi di riconoscimento e di memoria visiva. TE avrebbe funzioni omologhe ad aVMT. Nei primati, il lobo temporale ha numerose funzioni anche se la disposizione anatomica è differente rispetto all'uomo.

Sia nell'uomo che nei primati, le strutture del lobo temporale mediale includono l'amigdala, l'ippocampo, la corteccia rinale (endo e peririnale), il giro ippocampale. Tutte queste strutture sono implicate nella formazione della memoria dichiarativa; l'amigdala ha anche un ruolo addizionale negli stati emotivi, in particolare negli episodi di paura e negli stimoli dolorosi.

Tale organizzazione sembra essere molto simile nei primati non umani e nell'uomo. Nell'uomo la *sostanza bianca del giro* è più ampia rispetto alle scimmie; non solo rispetto all'estensione della corteccia, ma anche in relazione alla parte profonda della sostanza bianca stessa.

Ciò indicherebbe una migliore elaborazione delle informazioni e l'ampliamento dei processi cognitivi dell'uomo.

Sia nell'uomo che nelle scimmie è presente un'area cerebrale di associazione multisensoriale in prossimità del giro temporale superiore. Questa regione corticale nell'uomo è detta Planum temporale ed è simile all'area Tpt (che corrisponde alla parte posteriore dell'area di Broadmann 22) delle scimmie del vecchio mondo.

L'asimmetria citoarchitettonica localizzata a sinistra indica l'esistenza di funzioni multisensoriali soggette a lunghi fenomeni evolutivi.

13. Evoluzione del linguaggio

Per linguaggio si intende un sistema di segnali o simboli, che permette di trasmettere un'informazione da un sistema ad un altro.

In riferimento all'uomo, il linguaggio è un insieme di codici verbali e non verbali, che consentono di formulare e trasmettere messaggi.

Il linguaggio è generalmente considerato la capacità di esprimersi verbalmente. Esso costituisce, altresì, uno dei più importanti comportamenti sociali umani, che ha permesso l'evoluzione culturale della nostra specie poiché consente di accumulare le nostre conoscenze e tramandarle alle successive generazioni (una sorta di 'DNA' del pensiero).

Il linguaggio umano è associato a strutture semantiche e grammaticali, il cui livello di complessità si è accresciuto nel corso dell'evoluzione.

Gli studi sulle impronte endocraniche di ominidi fossili sembrerebbero confermare questo carattere evolutivo del linguaggio. Analoghe asimmetrie sono state rilevate anche nelle scimmie antropomorfe, capaci di utilizzare un codice paleo-linguistico, gesto-fonetico di comunicazione all'interno del gruppo.

Il linguaggio è, inoltre, un sistema complesso a più livelli: la sua produzione riguarda aspetti fonologici, morfologici e sintattici, oltre a coinvolgere la semantica ed il lessico.

La teoria evoluzionista cerca evidenze sullo sviluppo della capacità linguistica umana. Si sa che i due principali centri del linguaggio (l'area di Broca e di Wernicke) sono emersi nel cervello umano circa due milioni di anni fa, con l'emergere dei primi homo erectus. I paleontologi affermano che l'apparato di fonazione "moderno" (con la laringe sopra la trachea, che permette di poter modulare una grande

quantità di suoni) si sia organizzato successivamente alla nascita dell'*homo erectus* (che presenta ancora un apparato fonatorio molto simile all'*australopiteco*).

Ciò fa presumere che il linguaggio sia una caratteristica risalente all'*homo sapiens*. I cervelli dei nostri antenati ebbero rapidi incrementi volumetrici a differenza delle altre specie di mammiferi, come ad esempio i roditori. Le vaste aree volumetriche, col passare degli anni, cessarono di ampliarsi per dividersi in piccole aree corticali, ottenendo così piccole aree interconnesse in modo ottimale, che risultano più vantaggiose in un funzionamento di comparazione globale.

Nel corso dell'evoluzione il cervello umano ha avuto il maggior incremento volumetrico nelle regioni corticali fronto-parietali medie. Oltre a questi aspetti volumetrici, il cervello umano ha maggiore densità neuronale rispetto a quello degli altri mammiferi ed una più specifica organizzazione modulare (Gil-da-Costa et al, 2006).

Il linguaggio umano ha peculiari processi evolutivi:

Si presenta sin da specie precedenti

Nasce in un contesto prima di essere utilizzato in altri contesti. Ad esempio, specie di ominidi arboricoli avevano caratteristiche vocali simili già migliaia di anni prima di iniziare ad utilizzare il linguaggio articolato (Aboitiz et al., 2006).

Solo nell'uomo l'aorta carotide di sinistra, che irrorla l'area di Wernicke, si origina direttamente dall'arco aortico. Ciò consente l'esistenza di un flusso sanguigno cerebrale destinato più costantemente all'emisfero cerebrale sinistro rispetto a quello controlaterale (Bulla-Helwig et al., 1996).

14. Il ruolo dei neuroni specchio nell'evoluzione del linguaggio

Alcuni studi ritengono che la scoperta dei neuroni specchio sia stata altamente rilevante per identificare le corrispettive aree morfologiche cerebrali, che si trovano alla base dell'evoluzione del linguaggio umano.

La presenza di sistemi di neuroni specchio nelle scimmie, è stata scoperta negli anni novanta. Tali sistemi, localizzati nell'*area motoria supplementare* (F5) e nell'*area intra-parietale anteriore* (AIP) dei macachi, sembrano

coinvolti non solo nelle risposte motorie ad uno stimolo sensoriale, ma anche nel riconoscimento dell'atto motorio potenziale e complessivo.

Essi hanno funzioni diverse rispetto agli altri "classici neuroni visivi e motori".

Gli studi condotti sulle scimmie dimostrano, infatti, che tale tipologia di neuroni può avere caratteristiche *bimodali*, che si attivano in presenza di stimoli visivi e somato-sensoriali, o *trimodali*, che vengono attivati in seguito a stimoli somato-sensoriali, visivi ed uditivi (Arbib et al., 2000).

Questi neuroni si attivavano non solo mentre l'animale osservava l'azione, ma anche quando ne ascoltava solo il rumore. Durante l'osservazione, le informazioni senso-motorie attivano i *sistemi neurali specchio che anticipano lo scopo dell'azione* e che assumono il controllo della realizzazione. Dunque i neuroni specchio permettono di stabilire una relazione tra l'informazione visiva ed il riconoscimento dello schema motorio. Questa relazione genera una conoscenza di base del significato degli atti codificati, che permette sia la comprensione che l'esecuzione dell'azione. In questo caso, per comprensione si intende un processo di riconoscimento immediato degli schemi motori osservati. Le aree corrispondenti all'area F 5 nei macachi – nella quale, appunto, sono presenti i sistemi neuronali specchio – nell'uomo sembrano essere le *aree del lobo parietale inferiore* e l'area della *corteccia premotoria dorsale*.

In alcune ricerche si è potuto osservare che, nel momento in cui il soggetto comprendeva l'intenzione dell'azione, i neuroni specchio raggiungevano il picco massimo di attivazione nel *giro frontale inferiore posteriore destro*.

Tale attivazione evidenzerebbe che l'osservazione permette di cogliere le relazioni rappresentate dal contesto e di anticipare le intenzioni e le azioni successive (es. intenzione di prendere la tazza del caffè e bere alla quale segue l'azione se l'intenzione del bere è presente) (Ferrari et al., 2006).

Secondo alcuni studiosi, la specie Homo ha sviluppato le diverse modalità comunicative a partire dai comportamenti di imitazione consentiti dalle caratteristiche funzionali dei neuroni specchio e dal loro controllo cognitivo.

Queste forme comunicative sono state inizialmente gestuali e, nel corso dell'evoluzione, avrebbero originato le articolazioni del linguaggio verbale.

L'*Homo Habilis* comunicava attraverso una forma di proto-linguaggio gestuale; l'*Homo Erectus* sarebbe stato in grado di produrre un codice linguistico mimico-gestuale; mentre pare che l'*Homo Sapiens* abbia presentato per primo strutture cerebrali, che avrebbero permesso di associare al linguaggio gestuale le prime vocalizzazioni e avrebbero consentito, invece, nell'*Homo Sapiens Sapiens* l'uso cognitivo ed intenzionale della comunicazione gestuale e vocale.

Alcuni studiosi ipotizzano che alla base di questo processo evolutivo ci sia stato un meccanismo istintivo di atti comunicativi condivisi, che avrebbe permesso di associare il significato del gesto a quello della parola. Questi studi nascono dall'analisi delle radici delle parole storico-naturali, che evidenzerebbe stretti rapporti tra l'originario movimento manuale e l'articolazione vocale. Come per esempio, nel caso delle vocali come /a/ e /i/ o delle consonanti /m/ ed /r/ che riprodurrebbero rispettivamente movimenti ampi e o stretti (Gentilucci & Corballis, 2006).

Alcuni studi hanno valutato la funzione dell'area di Broca durante l'esecuzione di un compito in cui bisogna associare il riconoscimento di uno schema motorio o accompagnare l'espressione gestuale alla produzione di un predicato verbale.

È stata osservata l'attivazione dei circuiti specchio del giro frontale inferiore, del giro precentrale, della corteccia parietale inferiore e superiore e del solco intraparietale dell'emisfero sinistro, che costituirebbero i correlati morfologici e funzionali dell'articolazione vocale.

Considerando nel complesso gli aspetti produttivi e percettivi, i comportamenti linguistici coinvolgono prevalentemente le funzioni corticali dell'emisfero sinistro negli stessi punti in cui i sistemi neurali specchio sembrano essere più diffusi e strettamente collegati alle aree motorie.

Le recenti ipotesi relative ad una evoluzione parallela dei sistemi neurali specchio e delle capacità comunicative verbali e gestuali poggiano sull'importanza motoria e linguistica dell'area di Broca, responsabile dei movimenti laringei e oro-facciali e sede delle più importanti strutture neurali specchio.

Secondo gli studi sopra menzionati, lo sviluppo della facoltà del linguaggio verbale e della funzione linguistica è stata una conseguenza dell'evoluzione del tratto vocale sopralaringeo della specie *Homo Sapiens Sapiens*, che ha permesso di sfruttare a pieno i sistemi neurali specchio presenti nello stesso.

L'evoluzione del linguaggio, quindi, secondo tali teorie, sembra essere passata attraverso una serie di tappe in cui i neuroni specchio coinvolti nei processi di comprensione-riconoscimento immediato, apprendimento e imitazione, appaiono necessari e determinanti.

15. Il ruolo dei neuroni specchio nella musica

Un recente studio del professor Edward W. Large, della Florida Atlantic Academy, mostra le diverse risposte neurali all'ascolto di un brano musicale di particolare intensità emotiva (Frédéric Chopin's Étude in E- Major, Op. 10, No. 3), eseguito al computer e attraverso un'esecuzione umana.

Gli autori sono partiti dalla constatazione dell'arousal emozionale suscitato dall'ascolto della musica eseguita dal vivo, valutandone il livello di attivazione, per poi poterlo comparare con quello suscitato dal medesimo brano eseguito da un computer.

Il brano musicale, eseguito su un piano, è stato registrato durante la performance di un musicista, quindi ne è stata sintetizzata una versione utilizzando un computer. Entrambe le versioni proponevano gli stessi elementi musicali (melodia, armonia, ritmo, tempo e volume), come pure utilizzavano lo stesso pianoforte, ma, ovviamente, solo la performance espressiva includeva i cambiamenti dinamici di tempo e di volume.

Lo studio ha unito l'analisi comportamentale degli ascoltatori con l'fMRI cerebrale. Per garantire la coerenza delle emozioni espresse dai partecipanti, questi ultimi hanno seguito alcuni passaggi: hanno riportato le loro risposte emotive avvalendosi di un software specifico deputato a tale registrazione; sono poi stati sottoposti ad fMRI dopo essere stati invitati a chiudere gli occhi e a negare ogni emozione all'ascolto di ambedue le riproduzioni musicali e, infine, subito dopo la risonanza magnetica funzionale, hanno proceduto nuovamente all'assegnazione del rating emotivo (*Large & Chapin, 2010*).

I risultati di questo studio hanno confermato l'ipotesi che il tocco umano in una performance musicale evoca un arousal emozionale. Si è visto, inoltre, che ascoltatori esperti musicisti rispondono in maniera ancora più vivace all'ascolto, stimolando maggiormente i centri emozionali, nonché quelli del piacere.

Ma il risultato più interessante di questo studio è stata la rilevazio-

ne di attività neurali in reti motorie del cervello che, probabilmente, sono responsabili nell'ascolto del ritmo musicale.

Il prof. Large sostiene che tali risultati siano una conferma al fatto che i neuroni specchio forniscono un meccanismo attraverso cui gli ascoltatori percepiscono l'emozione dell'esecutore, rendendo la comunicazione musicale una forma di empatia. Questo perché le attivazioni neurali registrate sembrano dimostrare il ruolo fondamentale dei neuroni a specchio nella comprensione e nell'imitazione dell'azione.

Conclusioni

Alla luce di quanto descritto possiamo ipotizzare che il percolato musicale e sonoro esista solo in funzione di peculiari sistemi recettoriali atti ad accoglierlo.

La musica – in quanto insieme di frequenze che seguono determinate regole matematiche, spaziali e temporali – è essa stessa parte di un universo fisico, dato in quanto tale.

Il percolato musicale/sonoro esiste effettivamente come precursore linguistico, sia a livello genetico, che a livello biologico e comportamentale.

Come protolinguaggio sociale – fondamentale per la riproduzione, per la gestione della dominanza nei gruppi e per la comunicazione affettiva – si è evoluto successivamente in una struttura cerebrale umana, con regole sintattico/matematiche, spaziali e temporali proprie della comunicazione linguistica.

Il suono prosodico viene riconosciuto nelle primissime fasi evolutive, sia filogeneticamente che ontogeneticamente (anche in fase prenatale esiste il riconoscimento melodico/prosodico).

La funzione comunicativa musicale influenza anche la metacognizione in quanto attiva fondamentalmente anche processi sottocorticali, quindi guida, attraverso un processo top-down, l'elaborazione dell'informazione percettiva. La sua origine avviene in parallelo alla nascita del primo sistema recettoriale atto a trasdurre le frequenze in percezione, quindi nasce insieme all'evoluzione dell'essere vivente.

Il primo sistema recettoriale evolutivamente completo è stato il sistema aptico, da cui poi si sono originati i fotorecettori. Si potrebbe

anche supporre, data la presenza del *drumming* nei primati, date le frequenze vibratorie della musica e il coinvolgimento dei neuroni specchio durante l'ascolto di performance musicali, che uno dei primi canali recettoriali di percezione musicale sia stato quello aptico, che ancora oggi presenta risposte crossmodali se viene utilizzato durante l'ascolto musicale (Zatorre, 2011).

Bibliografia

- Aboitiz F., García R.R., Bosman C., Brunetti E. (2006). Cortical memory mechanisms and language origins. *Brain and Language*, 98, 1, 40-56.
- Alcock J. (1984). *Animal behavior: an evolutionary approach*. Sunderland, MA: Sinauer Associates. 1st Edition.
- Anderson B., Southern B.D., Powers R.E. (1999). Anatomic asymmetries of the posterior superior temporal lobes: a post mortem study. *Neuropsychiatry, Neuropsychology & Behavioral Neurology.*, 12, 4, 247-54.
- Arbib M.A., Billard A., Iacoboni M., Oztog E. (2000). Synthetic brain imaging: grasping, mirror neurons and imitation. *Neural Networks*, 13, 975-997.
- Arcadi A.C., Robert D., Mugurusi F. (2004). A comparison of buttress drumming by male chimpanzees from two populations. *Primates*, 45, 135-139.
- Beran M.J. (2006). Quantity perception by Adult humans (*Homo Sapiens*), Chimpanzees (*Pan troglodytes*) and Rhesus Macaques (*Macaca mulatta*) as a function of stimulus organization. *International Journal of Comparative Psychology*, 19, 386-397.
- Blood A.J., Zatorre R.J. (2001). Intensely pleasurable responses to music correlate with activity in brain regions implicated with reward and emotion. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98, 20, 11818-11823.
- Bulla-Hellwig M., Vollmer J., Gotzen A., Skreczek W., Hartje W. (1996). Hemispheric asymmetry of arterial blood flow velocity changes during verbal and visuospatial tasks. *Neuropsychology*, 34, 19, 987-991.
- Canestrari R., Godino A. (2007). *La psicologia scientifica. Nuovo trattato di psicologia*. Bologna: CLUEB.
- Chapin H., Jantzen K., Scott-Kelso J.A., Steinberg F., Large F. (2010). Dynamic emotional and neural response to music depend on performance expression and listener experience. *PLOS ONE* 5(12): e13812. doi:10.1371/journal.pone.0013812.
- Chladni E. (1787). *Entdeckungen über die Theorie des Klanges*. Leipzig: Weidmanns Erben und Reich.

- Consiglio C., Siani V. (2003). *Evoluzione e alimentazione. Il cammino dell'uomo*. Torino: Bollati Boringhieri.
- Crespi B., Summers K., Dorus S. (2007) Adaptive evolutions of genes underlying schizophrenia *Proceeding of Royal Society, B* 274, 2801-2810.
- Cross I. (2003). Music, cognition, culture, and evolution. In I. Peretz, R.J. Zatorre (Eds.), *The Cognitive Neuroscience of Music* (pp. 42-56). Oxford: Oxford University Press.
- Crow T.J. (2004). Auditory hallucinations as primary disorders of syntax: an evolutionary theory of the origins of language. *Cognitive Neuropsychiatry*, 9, 1/2, 125-145.
- Damasio A.R., Damasio H. (1992). Cervello e linguaggio. *Le Scienze*, 291, 65-72.
- Damasio A.R. (1999). Mente, coscienza e cervello. *Le Scienze*, 376, 98-104.
- Darwin C. (1871). *The Descent of Man and Selection in Relation to Sex*. London: John Murray.
- Deacon T.W. (2007). The evolution of language systems in the human brain. In Kaas J.H. (Ed.) *Evolution of Nervous Systems* (vol.4, pp. 529-548). London: Elsevier
- D'Errico F., Villa P., Pinto-Llona A.C., Ruiz Idarraga R. (1998). A Middle Palaeolithic origin of music? Using cave-bear bone accumulations to assess the Divje Babe I bone "flute". *Antiquity*, 72, 65-76.
- Diamond J. (1993). *The Third Chimpanzee: The Evolution and Future of the Human Animal*. New York: Harper Perennial.
- Ferrari P.F., Gallese V., Rizzolatti G., Fogassi L. (2006). Mirror neurons responding to the observation of ingestive and communicative mouth actions in the monkey ventral premotor cortex. *The European Journal of Neuroscience*, 17, 1703-1714.
- Feuk L., Kalervo A., Lipsanen-Nyman. M., Skaug J., Nakabayashi K., Finucane B., Hartung D., Innes M., Kerem B., Nowaczyk M., Rivlin J., Roberts W., Senman L., Summers A., Szatmari P., Wong P., Vincent J.B., Zeesman S., Osborne L.R., Cardy J.O., Kere J., Scherer S.W., Jouppi K.H. (2006). Absence of a paternally inherited FoxP2 gene in developmental verbal dyspraxia. *American Journal of Human Genetics*, 79, 5, 965-972.
- Fischer J., Hammerschmidt K. (2011). Ultrasonic vocalizations in mouse models for speech and socio-cognitive disorders: insights into the evolution of vocal communication. *Genes, Brain and Behavior*, 10, 17-27.
- Fitch W.T. (2011). The evolution of syntax: an exaptationist perspective. *Frontiers in Evolutionary Neuroscience*, 3, 9.
- Fitch W.T. (2006). The biology and evolution of music: A comparative perspective. *Cognition*, 100, 1, 173-215.
- Fitch W.T. (2000). The evolution of speech: a comparative review. *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 7, 258-267.

- Flinn M.V., Geary D.C. & Ward C.V. (2005). Ecological dominance, social competition, and coalitionary arms races: Why humans evolved extraordinary intelligence. *Evolution and Human Behavior* 26(1), 10-46.
- Gazzaniga M. (2004). *The Cognitive Neurosciences II*. Cambridge, MA: MIT Press. Bradford Books.
- Geary D.C. (2005). *The Origin of Mind, Evolution of Brain, Cognition and General Intelligence*. APA Press, second Printing.
- Gentilucci M., Corballis M.C. (2006). From manual gesture to speech: A gradual transition. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 30, 949-960.
- Gil-da-Costa R., Martin A., Lopes M.A., Muñoz M., Fritz J.B., Braun A.R. (2006). Species-specific calls activated homologs of Broca's and Wernicke's areas in the Macaque. *Nature Neuroscience*, 9, 1064-1070.
- Gougoux F., Zatorre R.J., Belin P., Voss P., Lepore F., Lassonde M. (2009). Voice perception in blind people: a functional magnetic resonance imaging study. *Neuropsychologia*, 47, 13, 2967-74.
- Gould S.J., Vrba E.S. (2008). *Exaptation. Il bricolage dell'evoluzione*. Torino: Boringhieri.
- Haesler S., Wada K., Nshdejan A., Morrissey E.E., Lints E.K.T., Jarvis E.D., Scharff C. (2004). FoxP2 expression in avian vocal learners and non-learners. *Journal of Neuroscience*, 24, 13, 3164-3175.
- Hara E., Kubikova L., Hessler N.A., Jarvis E.D. (2007). Role of the midbrain dopaminergic system in modulation of vocal brain activation by social context. *The European Journal of Neuroscience*, 25, 11, 3406-3416.
- Iriki A., Taoka M. (2012). Triadic (Ecological, Neural, Cognitive) niche construction: a scenario of human brain evolution extrapolating tool use and language from the control of reaching actions. *Philosophical Transactions of The Royal Society B*, Vol. 367, 1585, 10-23.
- Jacob F. (1978). *Evoluzione e bricolage*. Torino: Einaudi.
- Jarvis E.D. (2004). Learned birdsong and the neurobiology of human language. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1016, 749-777.
- Jenny H. (1967). *Kymatic*. In Jenny H. (2001). *Cymatics: A Study of Wave Phenomena & Vibration* (3rd ed.). Macromedia Press.
- Jürgens U. (2002). Neural pathways underlying vocal control. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 26, 2, 235-258.
- Jürgens U. (2009). The neural control of vocalization in mammals: a review. *Journal of Voice*, 23, 1, 1-10.
- Kaas J.H. (2008.) The evolution of the complex sensory and motor systems of the human brain. *Brain Research Bulletin*, 75, 2-4, 384-390.
- Kim J.K., Zatorre R.J. (2011). Tactile Auditory Shape Learning Engages the Lateral Occipital Complex. *The Journal of Neuroscience*, 31, 21, 7848-7856.
- Krings M., Stone A., Schmitz R.W., Krainitzki H., Stoneking M., Pääbo S.

- (1997). Neandertal DNA sequences and the origin of modern humans. *Cell Press*, 90, 1, 19-30.
- Kunej D., Turk I. (2000). New perspectives on the beginnings of music: archaeological and musicological analysis of a Middle Paleolithic bone 'flute'. In Wallin N.L., Merker B., Brown S. *The origins of music* (pp. 234-268). Cambridge, MA: MIT Press.
- Lai C.S.L., Gerelli D., Monaco A.P., Fisher S.E., Coop A.J. (2003). FoxP2 expression during brain development coincides with adult sites of pathology in a severe speech in language disorders. *Brain*, 126, 11, 2455-2462.
- Malafouris L. (2010). Metaplasticity and the human becoming: principle of neuroarchaeology. *Journal of anthropological Science*, 88, 49-72.
- Meng J., Wang Y., Li C. (2011). Transitional mammalian middle ear from a new Cretaceous Jehol eutriconodont. *Nature*, 472, 181-185.
- Miller G.F. (2000). Evolution of human music through sexual selection. In Wallin N.L., Merker B., Brown S. (Eds.) *The origins of music* (pp. 329-360). Cambridge, MA: MIT Press.
- Pascual-Leone A. (2003). The brain that makes music and is changed by it. In Peretz I., Zatorre R. (Eds.) *The cognitive neuroscience of music* (pp. 396-409). New York: Oxford University Press.
- Payne R., McVay S. (1971). Songs of humpback whales. *Science*, 173, 583-597.
- Pawlowski B. (2003) Variable Preference for sexual dimorphism in height as strategy for increasing the pool of potential partner in human. *Proceedings of the Royal Society London*. B. 270: 709-712.
- Pedersen C.A., Vadlamudi S.V., Boccia M.L., Amico J.A. (2006). Maternal behavior deficits in nulliparous oxytocin knockout mice. *Genes, Brain and Behavior*, 5, 3, 274-281.
- Radanovic M., Scaff M. (2003). Speech and language disturbances due to sub-cortical lesions. *Brain Language*, 84, 3, 337-352.
- Remedios R., Logothetis N.K., Kayser C. (2009). Monkey drumming reveals common networks for perceiving vocal and nonvocal communication sounds. *PNAS*, 106, 42, 18010-18015.
- Rilling J.K., Seligman R.A. (2002). A quantitative morphometric comparative analysis of the primate temporal lobe. *Journal of Human Evolution*, 42, 5, 505-33.
- Sacks O. (2010). *Musicofilia. Racconti sulla musica e il cervello*. Milano: Adelphi.
- Sawaguchi T. (1997) Possible involvement of sexual selection in neocortical evolution of monkeys and apes. *Folia Primatologica*, 68(2), 95-99.
- Schaller G.B. (1963). *The Mountain Gorilla: Ecology and Behavior*. Chicago: University of Chicago Press.
- Scharff C., Haesler S. (2005). An evolutionary perspective on FoxP2: strictly for the birds? *Current Opinion in Neurobiology*, 15, 6, 694-703.

- Shannon R.V., Zeng F.G., Kamath V., Wygonski J., Ekelid M. (1995) Speech recognition with primarily temporal cues. *Science*, 270, 303–304.
- Sloan C. (2004) The Human Story: our evolution from prehistoric ancestors to today. *National Geographic Press*.
- Sloboda J.A. (1991). Music structure and emotional response: some empirical findings. *Psychology of Music*, 19, 2, 110–120.
- Smaers J.B., Steele J., Case C.R., Cowper A., Amunts K., Zilles K. (2011). Primate prefrontal cortex evolution: human brains are the extreme of lateralized ape trend. *Brain Behavior and Evolution*, 77, 2, 67–78.
- Snowdon C. T., Teie D. (2010). Affective responses in tamarins elicited by species-specific music. *Biology Letters*, 6, 30–32.
- Tinbergen N. (1963). On aims and methods of ethology. *Zeitschrift für Tierpsychologie*, 20, 410–433.
- Tobach E. (2006). Identity of comparative psychology: its status and advances in evolutionary theory and genetics. *International Journal of comparative psychology*, 19, 129–150.
- Wallin N.L., Merker B., Brown S. (Eds). (2000). The origins of music. Cambridge, MA: MIT Press.
- Zatorre R.J. (2005). Music, the food of neuroscience? *Nature*, 434, 312–315.
- Zatorre R.J., Belin P., Penhune V.B. (2002). Structure and function of auditory cortex: music and speech. *Trends in cognitive science*, 6, 37–46.
- Zatorre R.J., Halpern A.R. (2005). Mental concerts: Musical imagery and auditory cortex. *Neuron*, 47, 9–12.